



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona



Ús de càmeres convencionals per a l'estimació del contingut de nitrogen en blat

Treball final de grau

Enginyeria de Sistemes Biològics

Autor: Gerard de Moragas

Tutors: Lydia Serrano Porta

Gil Gorchs Altarriba

Enric Fernández

10/ 01 / 2018

Resum

Per tal de millorar el maneig de la fertilització nitrogenada i el rendiments dels cultius de blat, es van aplicar quatre tractaments de fertilització nitrogenada (0, 60, 120 i 180 kg N/ha) a diferents parcel·les i es va determinar mitjançant diversos mètodes òptics el contingut de nitrogen i biomassa.

Primerament s'han realitzat diverses fotografies amb una càmera convencional amb tres filtres diferents (Visible, Infraroig i Infraroig proper) i se n'han calculat diversos índexs espectrals. A continuació s'han determinat els nivells de clorofil·la amb instrumentació òptica (CCM) i la fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada pel cultiu (fIPAR) i s'han estudiat les relacions entre aquestes variables i els índexs espectrals. Finalment s'ha determinat el rendiment del cultiu i s'han estudiat les relacions entre el rendiment i el contingut de nitrogen.

Els resultats mostren que les càmeres convencionals de baix cost poden proporcionar informació útil per estimar el contingut de nitrogen en blat.

Resumen

Para mejorar el manejo de la fertilización nitrogenada i los rendimientos de los cultivos de trigo, se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada (0, 60, 120 i 180 kg N/ha) en diferentes parcelas y mediante métodos ópticos se determinaron el contenido de nitrógeno y biomasa.

En primer lugar se realizaron varias fotografías usando una cámara convencional con tres filtros diferentes (visible, infrarrojo y el infrarrojo cercano) y se calcularon varios índices espectrales. Luego se determinaron los niveles de clorofila con instrumentación óptica (CCM) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fIPAR) y se estudiaron las relaciones entre estas variables y los índices. Finalmente se determinó el rendimiento del cultivo y se estudiaron las relaciones entre el rendimiento y el contenido en nitrógeno.

Los resultados muestran que las cámaras convencionales de bajo coste pueden proporcionar información útil para hacer una estimación del contenido de nitrógeno en el trigo.

Abstract

In order to improve the management of nitrogen fertilization and yields of wheat crops, four treatments of nitrogen fertilization (0, 60, 120 and 180 kg N / ha) were applied in different plots. Nitrogen content and biomass were estimated using optical methods.

First, several photographs were taken a consumer camera with three different filters (visible, infrared and near infrared) and several spectral indices were calculated. Then the levels of chlorophyll with optical instrumentation (CCM) and intercepted photosynthetically active radiation fraction (fIPAR) were determined and the relationships between these variables and the indices were studied. Finally, the crop yield was calculated and also the relationships between yield and nitrogen content.

The results show that conventional low cost cameras can provide useful information to estimate the nitrogen content in wheat.

Índex

SÍMBOLS I ACRÒNIMS	5
AGRAÏMENTS	6
1. INTRODUCCIÓ	7
2. OBJECTIU	10
3. MATERIAL I MÈTODES	11
3.1 Disseny experimental	11
3.2 Adquisició de dades.....	12
3.3 Rendiment	14
3.4 Processat	16
3.5 Anàlisi estadística	18
4. RESULTATS	19
5. DISCUSSIÓ	42
6. CONCLUSIONS	44
BIBLIOGRAFIA	45

Símbols i acrònims

A continuació es fa un recull de tots els símbols i acrònims que apareixen en aquest treball amb les seves respectives definicions.

CCM: Estima òptica del contingut de clorofil·la (*Chlorophyll Content Meter*).

DN: Nombres digitals (*digital numbers*).

fIPAR: Fracció de Radiació fotosintèticament Activa interceptada (fIPAR, *Photosynthetically active radiation*).

NIR: Banda d'infraroig proper

PAR: Radiació fotosintèticament activa (*Photosynthetically active radiation*)

RED: Banda del vermell

VIS: Banda del visible

Agraïments

En primer lloc donar les gràcies a la que ha sigut la meva tutora en aquest projecte, Lydia Serrano, professora en la Universitat Politècnica de Catalunya, per ajudar-me i guiar-me en tot moment durant la realització del treball.

Donar una mostra de gratitud a Gil Gorchs, professor també de l'escola, que m'ha ajudat en la realització de la part experimental d'aquest projecte i a l'Enric Fernández que m'ha ajudat amb el processat d'imatges amb el programa QGis

Donar també les gràcies a la meva companya Eva Iranzo que ha dut a terme la part experimental amb mi.

1. Introducció

El nitrogen és un nutrient primordial per a la síntesi de clorofil·la i altres components que les plantes necessiten (proteïnes, aminoàcids i àcids nucleics), és per això que s'aplica fertilitzants nitrogenat per millorar l'eficiència dels cultius.

Utilitzant un nivell de fertilitzant adequat es millora l'eficiència i s'obtenen els màxims beneficis possibles amb el menor impacte al medi, en canvi, un ús excessiu de nitrogen comporta problemes com una maduració tardana, aparició de certes malalties i males herbes i com a conseqüència, uns costos elevats (Skjødt, 2003) i també pot produir més pèrdues de nitrogen per volatilització, desnitrificació i escorrentia (Montemurro, 2009).

Per tant, cal avaluar molt bé la quantitat de nitrogen que la planta necessita, tenint en compte les necessitats del cultiu.

Per estimar el contingut de nitrogen de les plantes s'usen diversos mètodes, destructius i no destructius. Els destructius poden ser a vegades lents i costosos, per tant, sempre és convenient aplicar mètodes no destructius, que són els que es basen en determinar el contingut de nitrogen a partir de mètodes òptics.

El CCM (Chlorophyll Content Meter) és un instrument portàtil que permet determinar de manera ràpida i eficaç el contingut de clorofil·la en fulles. Està format per una petita cavitat on s'introdueix una secció de la fulla i una pantalla on hi apareixen els valors. La secció de fulla està exposada a dos focus de llum, el de roig i el d'infraroig i uns sensors situats sota la cavitat capturen la diferència en la transmissió de longitud d'ones i fa una estimació del contingut de clorofil·la per unitat d'àrea foliar (Muñoz-Huerta et al., 2013).

Un altre dels instruments usats és el ceptòmetre. Un aparell amb una barra amb 80 sensors que mesuren la Radiació Fotosintèticament Activa, quantitat de radiació capaç de produir activitat fotosintètica en las plantes (generalment es troba en un rang d'entre 400 i 700 nm). Amb el ceptòmetre obtindrem una estimació de la biomassa del cultiu.

La majoria de vegetals contenen pigments que capten diverses ones del espectre per dur a terme reaccions fotosintètiques. Les bandes que més absorbeixen les plantes són la blava (430 nm) i la vermella (600 nm) i per tant, són les que menys reflecteixen. En canvi, les bandes d'infraroig proper (900 nm) en les plantes presenten una elevada reflectivitat degut a la dispersió de la radiació en les interfícies aire-aigua de les cèl·lules.

L'espectre electromagnètic es defineix com el conjunt d'ones electromagnètiques, ones que es desplacen a la velocitat de la llum, des de la màxima freqüència (com els raigs x) a la mínima freqüència (com les ones de radio). En aquest treball ens interessen tres bandes en concret, la del visible, la del vermell (680 nm de longitud d'ona) i la del NIR o infraroig proper (900 nm). La longitud d'ona (λ) es defineix com la distància entre l'inici i el final d'una ona completa (anomenat cicle) i es mesura amb metres, nanòmetres o micròmetres. Un nanòmetre = 1 nm = 10^{-9} m.

Els índexs de vegetació o índexs de reflectància espectrals (situats a la *Taula 3.4.1*) que s'han utilitzat en aquest treball són mesures quantitatives, adimensionals, basades en valors digitals per estimar biomassa i vigor vegetal. Generalment, aquests índexs són producte, divisió o suma dels valors espectrals. Existeixen molts índexs de vegetació, alguns dels quals es basen en la interacció entre vegetació i energia electromagnètica de bandes com el vermell o el infraroig proper (Wiegand et al., 1991).

Un dels que s'ha utilitzat en aquest treball és l'índex de vegetació de diferència normalitzada (NDVI, Rouse et al. 1974 and Tucker 1979). Ens permet estimar la quantitat, qualitat i desenvolupament de vegetació mitjançant la intensitat de radiació de diferents bandes en l'espectre electromagnètic que la planta emet o reflecteix. Aquest índex, pren valors entre -1 i 1, cosa que facilita la seva interpretació. Quan la vegetació és vigorosa, reflecteix molta radiació solar en l'infraroig proper i poca en el vermell i, en conseqüència, s'obté un NDVI elevat. En canvi, quan la vegetació es poc vigorosa, reflecteix poca en l'infraroig proper i molt en el vermell. Per tant, per valors de NDVI negatius, estaríem

parlant de cobertes artificials o aigua, un NDVI amb valors de 0 i 0,3 parlaríem de sòl i un NDVI superior a 0,3 parlaríem de vegetació (Chuvieco, 2008).

L'índex SR (Jordan, 1969 i Pearson and Miller, 1972), també anomenat RVI i equivalent al NDVI, fa una estimació de la biomassa i àrea foliar. Mostra uns valors elevats en vegetació i uns valors baixos al sòl, aigua i altres objectes naturals.

Els índexs SR i NDVI responen simultàniament al contingut de clorofil·la i a la biomassa i no són prou adequats a l'hora de discriminar el contingut de nitrogen. És per això que s'han explorat altres índexs, independents de la biomassa del cultiu. L'índex NGRDI, índex verd-vermell de diferència normalitzada (Tucker, 1979) és equivalent al G/R. L'índex verd de diferència normalitzada (gNDVI) és una variant del NDVI i ens permetrà determinar el nivell d'activitat fotosintètica o el nivell de verdor. És un índex que ens indica la quantitat d'aigua i nitrogen absorbit per la planta i finalment l'índex GLI, índex de fulla verda, (Louhaichi et al, 2001) també ens indica el valor del "verdor" de la fulla.

La instrumentació utilitzada per determinar continguts de clorofil·la i la radiació fotosintèticament activa interceptada (CCM i PAR) tenen un cost elevat en comparació amb les càmeres convencionals utilitzades per extreure els valors del índexs espectrals. A més a més, la informació que proporcionen les imatges és més representativa (una àrea major en comparació amb CCM, per exemple).

2. OBJECTIU

L'objectiu principal d'aquest projecte és avaluar la idoneïtat de diversos índexs espectrals derivats del visible i infraroig proper obtinguts amb càmeres convencionals per fer una estimació del contingut de nitrogen en un cultiu de blat.

3. MATERIAL I MÈTODES

3.1 Disseny experimental

La part experimental es va dur a terme als camps de la Universitat Politècnica de Catalunya, situada a Castelldefels (41°16'35.2"N 1°59'10.3"E), en els horts de l'Escola Superior d'Agricultura. Es tracta de 18 parcel·les (*Figura 3.1.1*) que han sigut usades altres anys per la realització d'altres projectes similars a aquest.



	1	2	3
1	N-0	N-0	N-240
2	N-60	N-180	N-120
3	N-120	N-60	N-0
4	N-0	N-120	N-180
5	N-180	N-0	N-60
6	N-240	N-240	N-0

Figura 3.1.1: Situació de l'àrea d'estudi on es mostren els camps de la Universitat i les parcel·les.

El 2 de març del 2017 es van sembrar cultius de blat de la varietat Odiel (*Triticum aestivum*) a cada una d'aquestes 18 parcel·les. La varietat Odiel (*Figura 3.1.2*) és una varietat de blat tou de primavera, subministrat per l'empresa Limagran Ibérica.



Figura 3.1.2: Blat de la varietat Odiel.

El dia 29 de març, es va realitzar un control de naixença i estadi i el 6 d'abril es va aplicar 2,5 L/ha d'herbicida Certrol per evitar l'aparició de males herbes i el 9 de maig es va aplicar 500 cc/ha del fungicida Amistar.

Les dosis de Nitrogen de 0, 60, 120 i 240 kg N/ha van ser aplicades de manera fraccionada: la primera va ser aplicada el 31 de març (0, 30, 45 i 60 kgN/ha), i la segona al 4 de maig (0,

30, 45 i 60 kgN/ha). Aquestes dates corresponen a estadis fenològics que encara permeten aplicar mesures correctores (adobat addicional) en cas que sigui necessari.

3.2 Adquisició de dades

Es van adquirir imatges en les dotze parcel·les centrals dels camps (les que apareixen en gris clar en la *Figura 3.1.1* no van ser objecte d'estudi) utilitzant una càmera convencional muntada en un trípod a aproximadament 50 cm per damunt de la coberta.

Per dur a terme aquesta part, es va programar la càmera (Sony NEX-5N) de manera que sempre realitzés les imatges en mode manual, així es va poder decidir el temps d'exposició i la ISO que s'ajustaven més a les característiques del lloc. Es va escollir un temps d'exposició de 1/1250 s, una obertura de f/2,8 i una ISO de 100.

Es van realitzar tres fotografies a cada parcel·la, una amb filtre VIS, una amb el filtre RED i una altre amb el filtre NIR i a l'inici de cada sessió de mostreig també es realitzaven imatges en un panell de referència (una per cada filtre). Les imatges sempre es realitzaven al mateix lloc gràcies a unes banderes vermelles que van ser clavades al centre de cada parcel·la tot just començar l'assaig.

Les imatges es realitzaven en format RAW per després convertir-les, amb l'ajuda del programa *photoshop*, a TIFF per el posterior tractament digital amb QGIS.

Un cop les imatges van ser preses per cada un dels tres filtres i per cada una de les dotze parcel·les es van dur a terme les mesures òptiques amb el ceptòmetre i CCM. Les mesures es van prendre *in situ* a fi d'evitar tallar les fulles.

Es va fer una tria aleatòria de 8 fulles del capdamunt de la coberta a cada una de les parcel·les i amb el CCM es va determinar el contingut de clorofil·la. Es van calcular les mitjanes i desviacions estàndards d'aquestes 8 fulles per cada parcel·la.

Les mesures del ceptòmetre es van realitzar en un lloc contigu a on es van obtenir les imatges de cada parcel·la. Es va fer una mesura a la part superior de la planta (a uns 60 cm sobre la coberta) i cinc mesures arran de sòl. Tot seguit es va calcular la mitjana d'aquests cinc valors per tal d'obtenir un resultat més representatiu i es va calcular el percentatge de radiació interceptada:

$$fIPAR = \frac{(PAR_{dalt} - PAR_{baix}) * 100}{PAR_{dalt}}$$

Equació 3.2: fIPAR interceptat.

Aquestes mesures a camp van tenir lloc el 15, 17 i 26 de maig i 8 de juny.

3.3 Rendiment

El 29 de juny es van recollir tres mostres de cada una de les dotze parcel·les per, posteriorment, el dia 11 de juliol, dur-les al laboratori i avaluar-ne el rendiment.

Les mostres venien en bosses de plàstic, per tant, primer de tot es va pesar la bossa i la mostra conjuntament i després la bossa sola per obtenir el pes de la mostra. A continuació, i amb l'ajuda d'unes tisores es van separar les espigues de les canyes i es van comptar. Tot seguit, es van pesar sobres de paper, s'hi van incorporar les espigues i es va pesar de nou.

Les canyes es van incorporar a unes safates (d'alumini o de ferro prèviament pesades) i van ser pesades amb una balança per finalment posar-les a l'estufa on romandrien 24 h a 105 °C. L'endemà aquestes safates van ser extretes de l'estufa de tres en tres per ser pesades de nou.



Figura 3.3.1: Canyes de blat després de romandre a l'estufa 24h.

El 18 de juliol, les espigues ensobrades i pesades en el laboratori una setmana abans, es van transportar fins l'Agròpolis de Viladecans, on, amb una desgranadora mecànica, es van separar els grans de la resta de l'espiga. Posteriorment es van pesar, es va mesurar la humitat i es van afegir en unes bosses de plàstic.

El 25 de juliol, de nou al laboratori, es van agafar, amb l'ajuda d'un vas de precipitats, mostres de grans d'aproximadament 15 mL i es van introduir en safates d'alumini i es van assecar a l'estufa durant 24 hores aproximadament. Passat aquest temps van ser pesats de nou. Amb un altre vas de precipitats, es van agafar més mostres de grans i van ser comptats amb una màquina comptadora de grans de la marca *numigral*, tal i com es pot observar en la *Figura 3.3.2* El procediment era molt senzill: es posaven els grans dins del plat de metall i al posar-se la màquina en marxa, els grans anaven movent-se (degut a la vibració que ocasionava l'aparell) fins arribar a un conducte molt prim on només hi podia passar un gra, això facilitava que, al arribar a la part del comptador, fora més fàcil per la màquina contar els números de grans que passaven. Els grans contats es recollien en un altre vas de precipitats i es posaven de nou a la bossa.

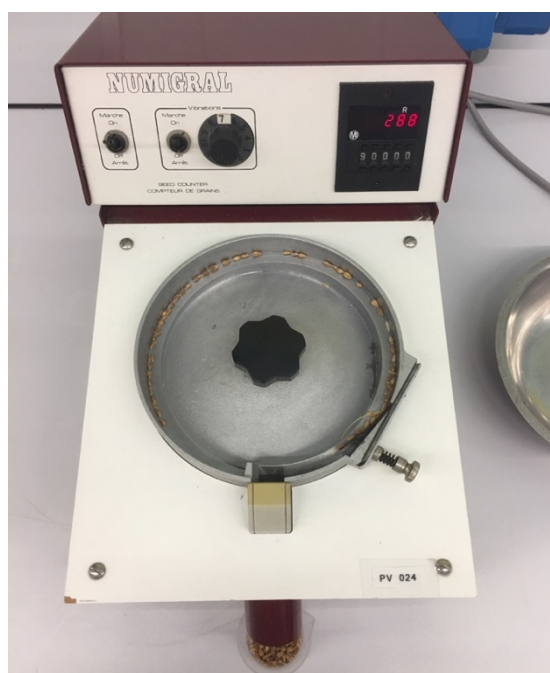


Figura 3.3.2 Comptadora mecànica de grans.

3.4 *Processat*

Fins aquí va tenir lloc la part experimental a camp i laboratoris. A continuació es va realitzar l'anàlisi de totes les imatges preses durant les sessions a camp mitjançant dos programes d'ordinador. En primer lloc es van agafar les totes les fotografies en format RAW i es varen convertir a TIFF, sense compressió per mantenir tota la informació, amb l'ajuda del *photoshop*, mantenint sempre la nomenclatura que apareixia en la càmera un cop les imatges van ser preses.

Aquestes imatges en format TIFF van ser retallades a fi d'eliminar efectes que podien intervenir en l'anàlisi de dades i que podien ser causa de possibles errors, com per exemple l'efecte vinyeta que fa que apareguin ombres no desitjades als extrems de cada foto o, l'aparició de les nostres pròpies ombres durant la presa d'imatges. Per tant, es va retallar el centre de cada imatge de manera exacta. Això també es va fer amb l'ajuda del *photoshop*.

Un cop totes les imatges van ser retallades, es van incorporar en el programa *QGIS*, es van buscar els valors màxims, mínims, les desviacions estàndard i les mitjanes dels valors digitals (DN) de cada una de les imatges i es van copiar aquestes dades a un full d'Excel per posteriorment, calcular els corresponents índexs.

Cada imatge del visible consta de tres bandes. Quan la imatge es genera amb el filtre que només deixa passar la llum visible, la càmera guarda la imatge en tres canals (vermell, verd i blau), per calcular els NDVI es va usar la banda 1 que correspon a vermell (*red*).

Quan la imatge es captura amb el filtre que només deixa passar la llum infraroja, la càmera també genera tres canals, però tots contenen la mateixa informació, ja no és un canal RGB (*red, green, blue*) i per tant, es pot triar el canal que més convingui. Observant els histogrames del les imatges mitjançant *QGIS*, es va veure que hi havia un canal que no estava sobreexposat (tenia uns valors DN baixos) i era la banda 2, que tenia uns valors entre 50 i 200 DN.

Utilitzant les mitjanes extrems del QGIS es van calcular tots els índexs amb les equacions que es mostren a continuació:

Taula 3.4.1: Índexs utilitats, equació i referències.

NOM	ACRÒNIM	EQÜACIÓ	REFERÈNCIA
Índex de vegetació de diferència normalitzada	NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rouse et al. (1974) and Tucker (1979)
Índex de vigor relatiu	SR	$\frac{NIR}{RED}$	Jordan (1969) and Pearson and Miller (1972)
Índex verd-vermell de diferència normalitzada	NGRDI	$\frac{Green - RED}{Green + RED}$	Tucker (1979)
Índex verd-vermell	G/R	$\frac{Green}{RED}$	Schirrmann et al (2016)
Índex verd de vegetació de diferència normalitzada	gNDVI	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Gitelson et al. (1996)
Índex de fulla verda	GLI	$\frac{2 * Green - RED - Blue}{2 * Green + RED + Blue}$	Louhaichi et al. (2001)

Es va utilitzar la banda 2 de les imatges amb el filtre NIR tal i com s'ha comentat anteriorment i la banda 1, 2 i 3 de les imatges amb el filtre VIS, que corresponen a RED, GREEN i BLUE respectivament.

Un cop obtingut els valors de tots aquests índexs, es va realitzar el mateix procediment amb les imatges preses en el panell de referència. Es van obrir amb *QGIS* per obtenir mitjanes i amb aquestes, dividint-les amb les mitjanes obtingudes amb les imatges a camp, es va calcular els valors de reflectivitat de cada imatge, de cada filtre i de cada banda.

Amb aquests nous valors, es van calcular els índexs (utilitzant les mateixes equacions) i es va veure que excepte pel NDVI on els valors s'acostaven més als esperats, els altres índexs eren molt semblants als calculats anteriorment a partir dels nivells digitals de la imatge. Per l'anàlisi i la posterior comparació es va tenir en compte aquests nous índexs calculats a partir de la reflectivitat en comptes dels anteriors calculats en base als nivells digitals (DN, *digital number*).

3.5 Anàlisi estadística

Per tal d'avaluar la idoneïtat dels índexs espectrals com indicadors del vigor i contingut del nitrogen es van estudiar les relacions entre les diferents variables e índexs mitjançant correlacions, tant pel dia 15 de maig com pel 8 de juny. El 26 de maig els valors obtinguts mostraven una baixada important en els nivells de clorofil·la en alguna de les parcel·les, degut potser a un error en la presa de dades, i es per això que s'ha prescindit de les dades d'aquest dia.

Un cop vistes les correlacions existents entre fIPAR, CCM, rendiment i els índexs espectrals, es va fer una anàlisi de variància (ANOVA) amb el programa *SPSS* en funció del tractament de nitrogen (N0, N60, N120 i N180) per ambdós dies.

Finalment, degut a la gran variabilitat dins dels tractament, es va fer una comparació entre els tractaments considerant conjuntament l'aportació o no de fertilitzant.

En aquest estudi s'ha considerat que per valors de $P < 0,10$ existeixen diferències marginalment significatives. Per valors de $P < 0,05$ hi ha diferències significatives i per valors de $P < 0,01$ trobem diferències altament significatives.

4. RESULTATS

Relacions entre els índexs espectrals i fIPAR i CCM

A continuació es mostren les correlacions entre els diferents índexs i els valors de fIPAR, CCM i rendiment i biomassa dels cultius, tant pel 15 de maig com pel 8 de juny.

Taula 4.1: Taula de correlacions entre els índexs i valors de les variables estudiades.

DATA		15 MAIG				8 JUNY			
INDEX		fIPAR	CCM	RENDIMENT	BIOMASSA	fIPAR	CCM	RENDIMENT	BIOMASSA
NDVI	PEARSON	0,826	0,738	0,775	0,733	0,779	0,789	0,786	0,767
	P<	0,001	0,006	0,003	0,007	0,003	0,002	0,002	0,004
G/R	PEARSON	0,727	0,713	0,696	0,627	0,606	0,748	0,649	0,603
	P<	0,007	0,009	0,012	0,029	0,037	0,005	0,022	0,038
NGRDI	PEARSON	0,725	0,705	0,688	0,620	0,602	0,753	0,648	0,602
	P<	0,008	0,01	0,013	0,32	0,039	0,005	0,023	0,039
GLI	PEARSON	0,131	-0,061	-0,086	-0,139	0,720	0,454	0,666	0,614
	P<	0,685	0,851	0,791	0,666	0,008	0,138	0,018	0,034
gNDVI	PEARSON	0,832	0,73	0,779	0,744	0,831	0,771	0,817	0,811
	P<	0,001	0,007	0,003	0,005	0,001	0,003	0,001	0,001
SR	PEARSON	0,82	0,751	0,773	0,724	0,771	0,777	0,774	0,752
	P<	0,001	0,005	0,003	0,008	0,003	0,003	0,003	0,005

Tal i com es veu en la taula anterior, la gran majoria d'índexs i variables es troben correlacionades entre elles ($P < 0,05$). Les que no tenen una relació significativa es mostren en gris.

Els resultats d'aquest treball es mostren a continuació.

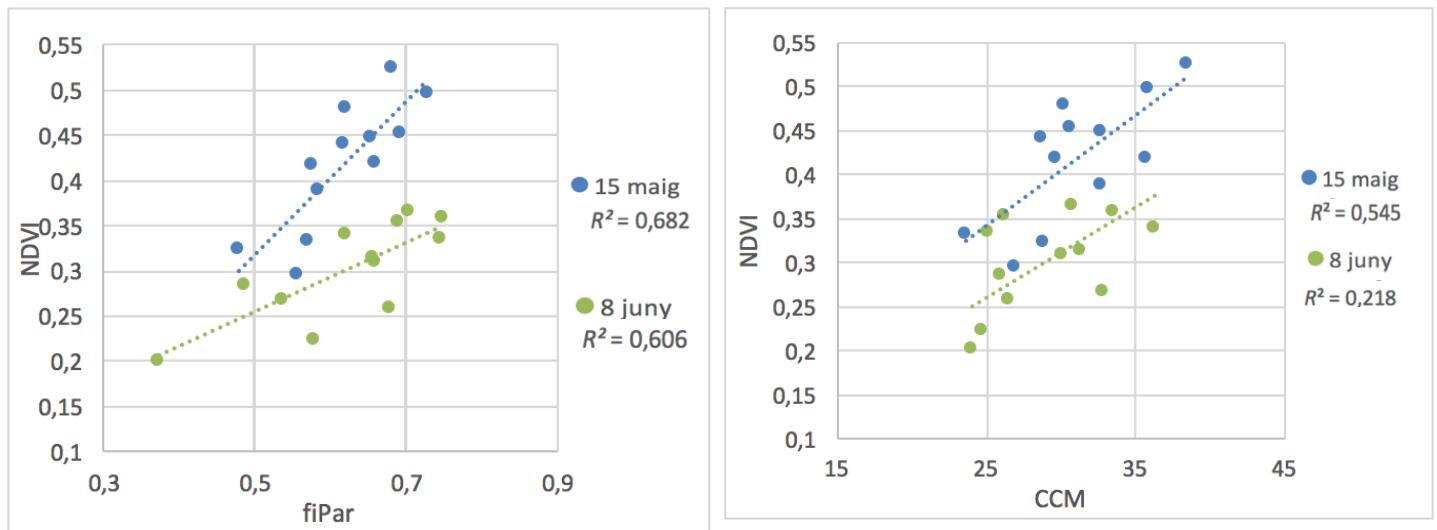


Figura 4.1: Relació entre valors de NDVI amb fPAR i CCM.

A la figura 4.1, s'observa que existeix una relació significativa evident entre els valors NDVI i CCM i fPAR. A més biomassa (fPAR), l'índex de vegetació de diferència normalitzada augmenta, i similarment, a més nivell de clorofil·la (CCM) també ho fa el valor de NDVI

El 15 de maig, aquesta relació és més estreta (més significativa) ja que la vegetació és verda, mentre que el 8 de juny els coeficients de determinació són menors ja que la vegetació començava a estar senescent.

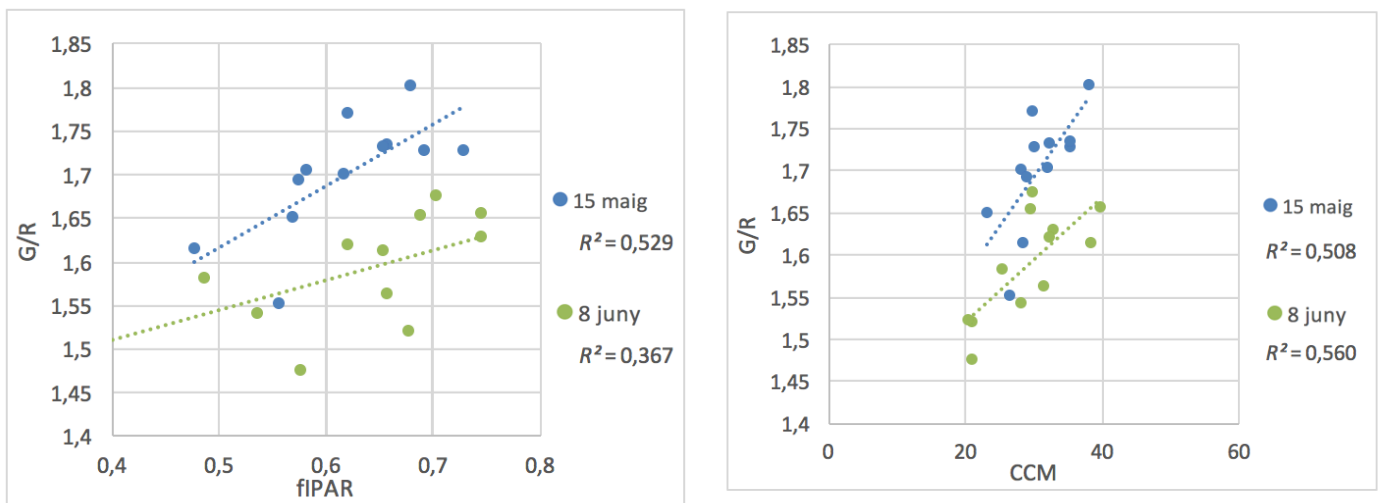


Figura 4.2: Relació entre valors de G/R amb fIPAR i SPAD.

En la figura 4.2 s'observa la relació que existeix entre l'índex G/R amb fIPAR i CCM.

Pel 15 de maig aquesta relació amb el fIPAR és força elevada i podem dir que quan la biomassa augmenta (valors de fIPAR), també ho fan els valors de l'índex. El 8 de juny aquesta relació no és tan evident.

Referent als nivells de clorofil·la, s'observa que en ambdós dies, la relació és força elevada i, tret d'algun valor, a mesura que el nivell de clorofil·la augmenta, també augmenta el valor de l'índex G/R.

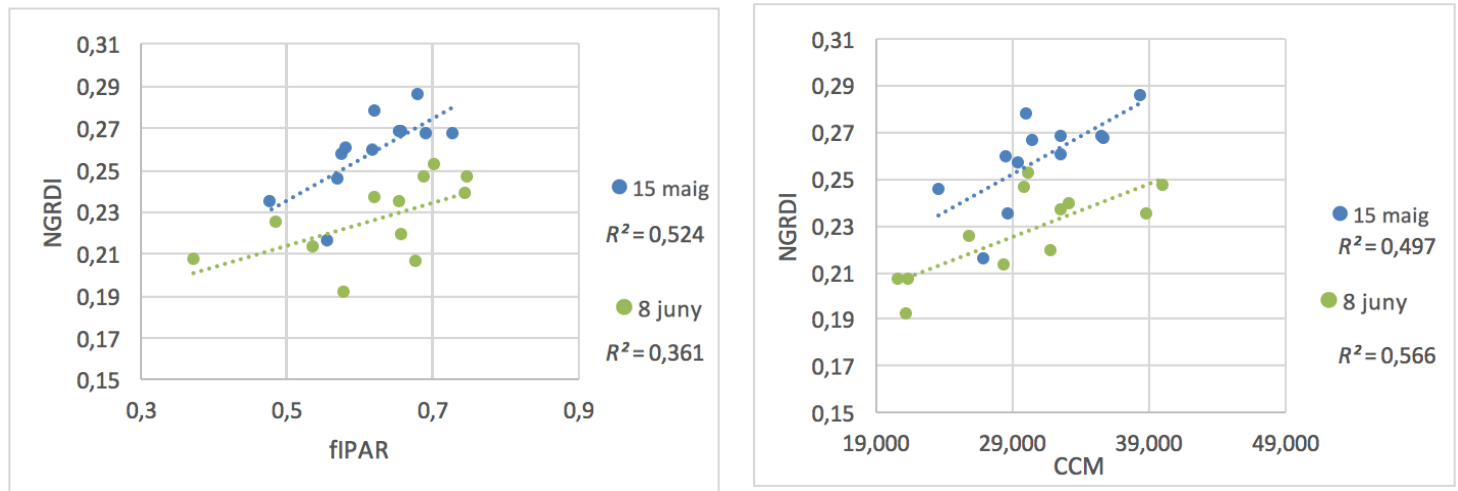


Figura 4.3: Relació entre valors de NGRDI amb fIPAR i CCM.

En la figura 4.3 es pot veure la relació entre els valors de NGRDI amb valors de fIPAR i CCM.

En ambdós dies, el valor de R^2 és aproximadament els 0,5, excepte el 8 de juny on la relació NGRDI vs fIPAR té un valor de R^2 de 0,36.

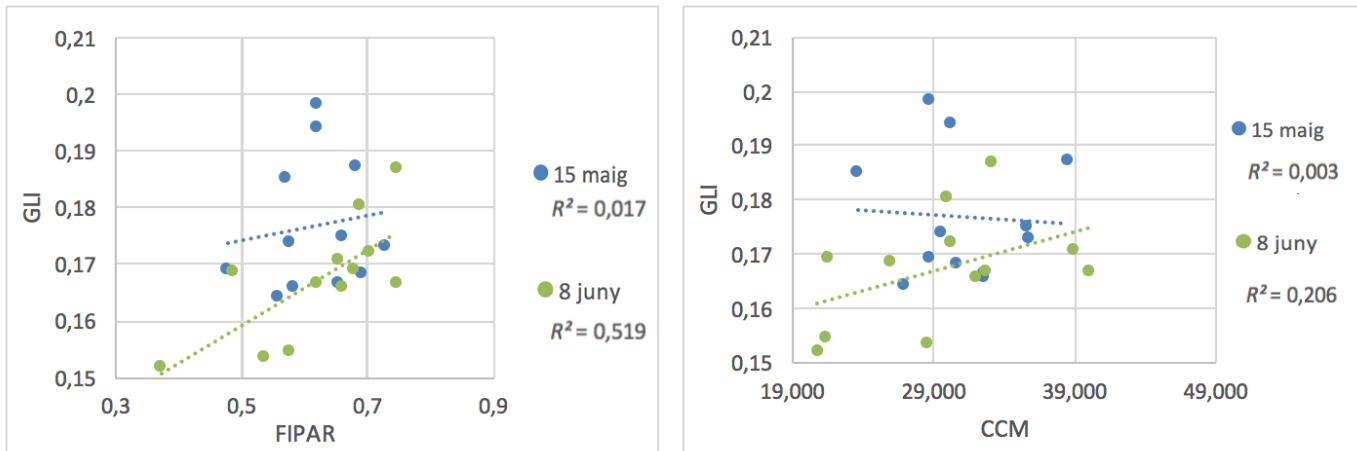


Figura 4.4: Relació entre valors de GVI i fIPAR i CCM.

En la figura 4.4 es pot veure la relació entre els valors de GVI amb valors de fIPAR i CCM.

Aquest índex (de fulla verda) sembla que no mostra cap relació entre fIPAR i CCM, la R^2 és petita el 15 de maig i a mesura que passa el temps, al 8 de juny, és molt menor.

La fulla és més verda el 15 de maig que no pas el 8 de juny, que es troba en estat de senescència.

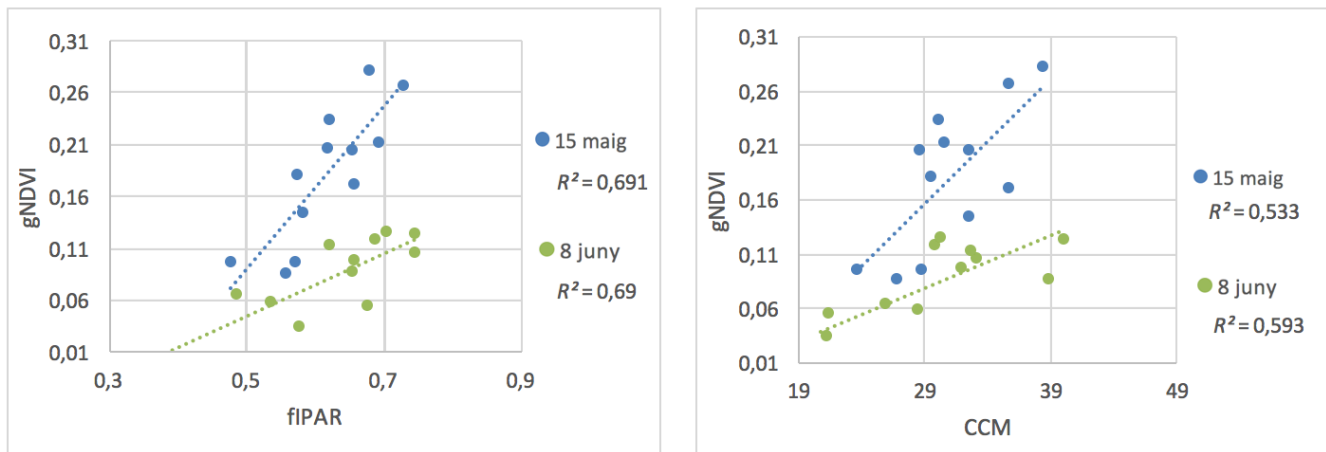


Figura 4.5: Relació entre valors de gNDVI amb fIPAR i CCM.

En el figura 4.5 es pot veure la relació entre els valors de gNDVI amb valors de fIPAR i CCM.

El 15 de maig el nivell de verd és superior al del 8 de juny (les fulles comencen a ser més grogues) i, a mesura que la biomassa augmenta, el nivell de verd augmenta. El mateix passa amb el nivell de clorofil·la, a més clorofil·la, més verdor.

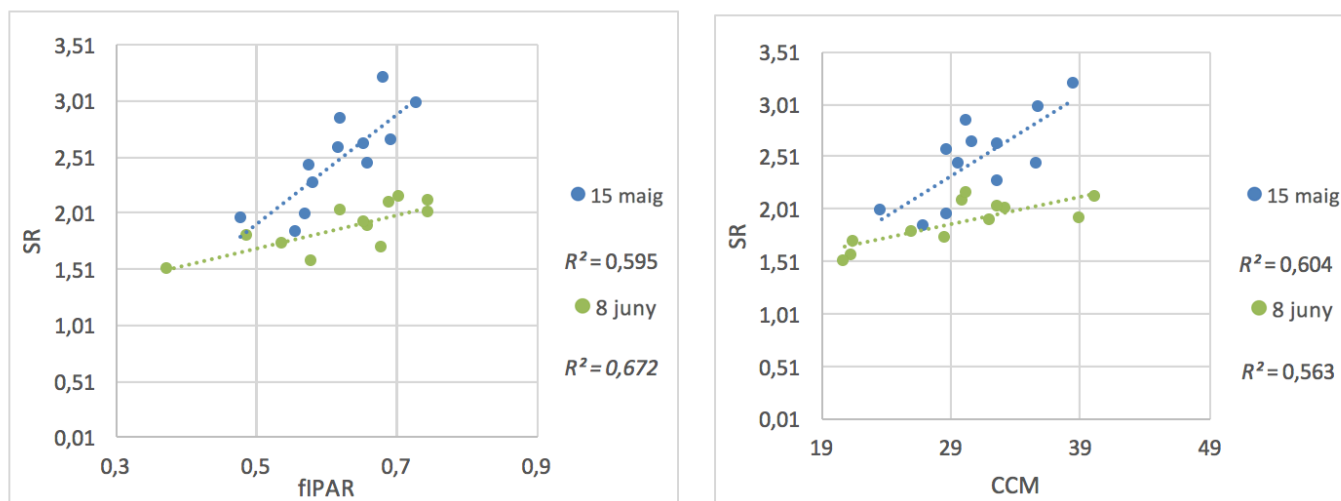


Figura 4.6: Relació entre valors de SR amb fIPAR i CCM.

En la figura 4.6 es pot veure la relació entre els valors de SR amb valors de fIPAR i CCM.

Per l'índex SR la relació es igual al NDVI excepte en CMM el 8 de juny, que la relació es major en el SR que no pas el NDVI.

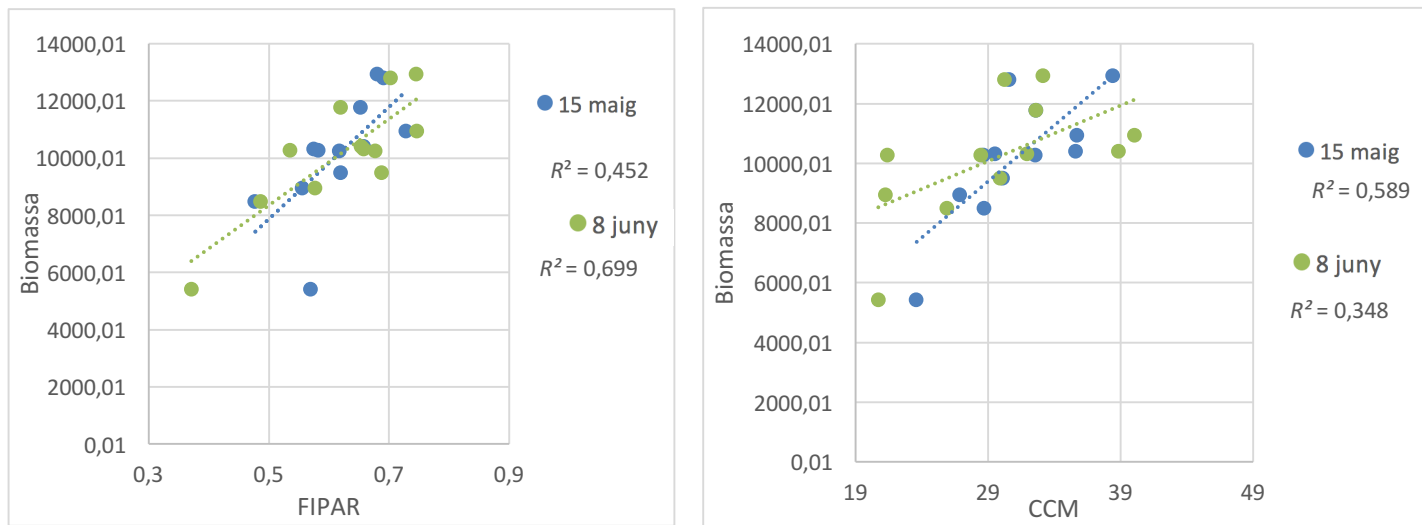


Figura 4.7: Relació entre valors de Biomassa amb fIPAR i CCM.

En la *figura 4.7* es pot veure la relació entre els valors de biomassa amb valors de fIPAR i CCM.

Mentre que el 8 de juny, la relació entre fIPAR (estimació de biomassa) i biomassa és major, en el cas de CCM la relació es major el 15 de maig, ja que el 8 de juny, la vegetació de blat estava senescent.

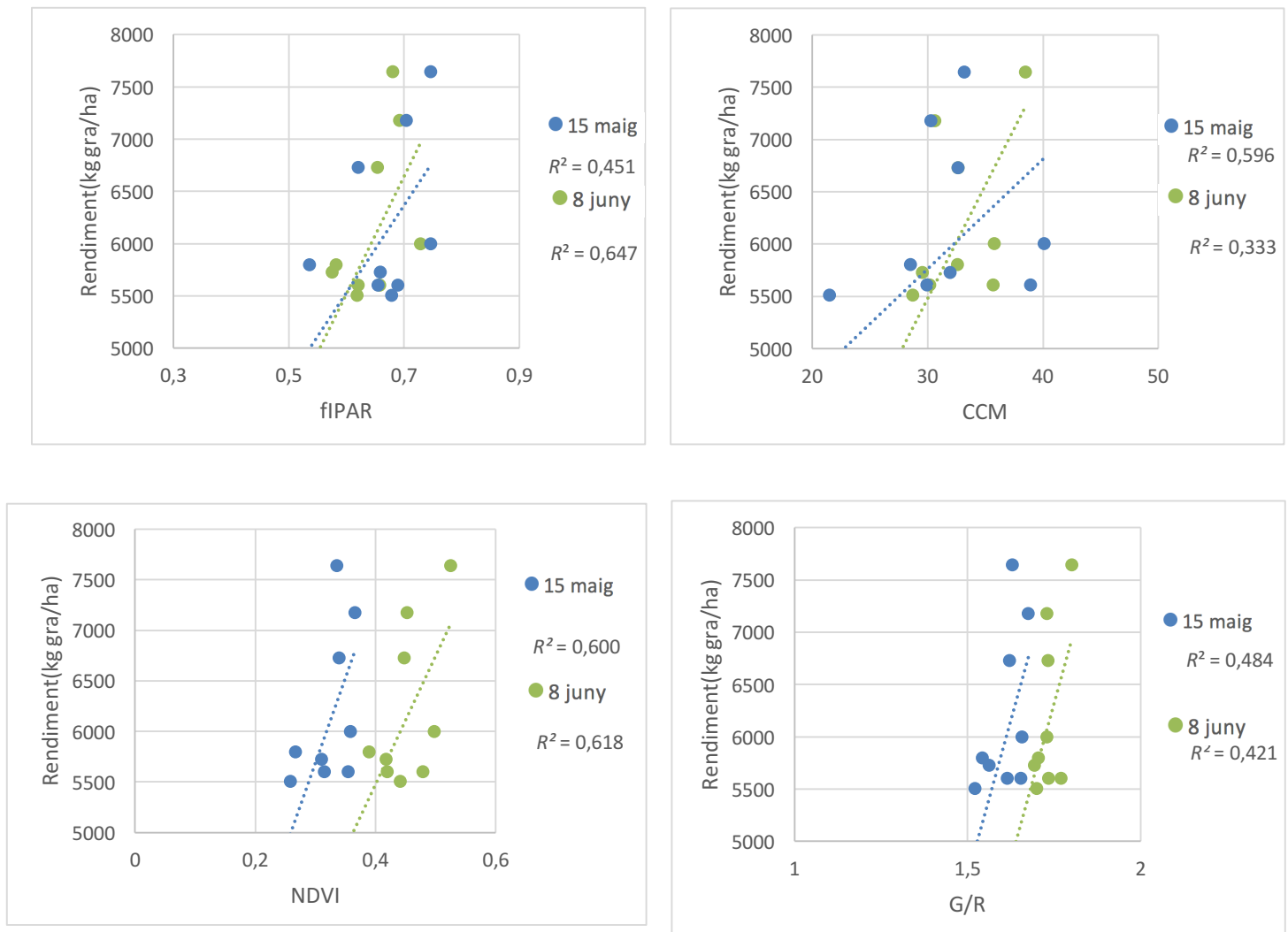


Figura 4.8: Relació entre valors de Rendiment amb fIPAR i CCM i NDVI i G/R.

En figura 4.8 es pot veure la relació entre els valors de rendiment amb valors de fIPAR i CCM.

Mentre que el 8 de juny, la relació entre fIPAR i rendiment és major, en el cas de CCM, la relació es major el 15 de maig, ja que el 8 de juny les fulles de blat estaven en estat de senescència. El fIPAR no és bon indicador de la part fotosintètica quan la coberta vegetal és senescent (Serrano et al, 2000). El NDVI és bon estimador del rendiment.

Efectes de la dosi d'adobat nitrogenat

Es va fer una anàlisi de la variància (ANOVA) en funció de la dosi d'adobat nitrogenat incorporat a cada parcel·la (0, 60, 120 i 180 kg N/ha) per tal de determinar si existeixen diferències significatives entre tractaments.

Pel 15 de maig es va observar el nivell de significació de l'ANOVA per a cada variable estudiada i es va observar que en cap cas les diferències entre tractaments van ser significatives (Taula 4.2). Per contra, el 8 de juny es van trobar diferències significatives entre dosis d'adobat ($P < 0,05$) en els valors de CCM, NDVI, G/R, NGRDI, gNDVI i SR.

A continuació es mostra una taula amb els nivells de significació de cada variable.

Taula 4.2: Nivells de significació (P) d'ANOVA per a les diferents variables estudiades en funció de la dosi d'adobat.

	SIGNIFICACIÓ	
	15 MAIG	8 JUNY
RENDIMENT	0,248	0,248
BIOMASSA	0,302	0,302
fIPAR	0,548	0,533
CCM	0,074	0,023
NDVI	0,262	0,008
G/R	0,243	0,020
NGRDI	0,242	0,018
GLI	0,641	0,197
gNDVI	0,295	0,013
SR	0,287	0,011

A continuació es mostren les taules de cada variable segons la dosi d'adobat, l'error estàndard de la mitjana i la separació de mitjanes.

Taula 4.3: Valors de fIPAR i CCM (mitjana i error estàndard de la mitjana) per als diferents nivells d'adobat nitrogenat el 15 de maig. Els valors seguits de lletres diferents indiquen diferències significatives ($P < 0,05$) d'acord amb el test de Tuckey.

15 MAIG	fIPAR	CCM	NDVI
N0	0,581 + 0,018 a	26,38 + 1,48 a	0,311 + 0,045 a
N60	0,610 + 0,064 a	34,27 + 2,88 a	0,380 + 0,060 a
N120	0,616 + 0,037 a	30,90 + 0,90 a	0,377 + 0,019 a
N180	0,667 + 0,032 a	32,83 + 1,61 a	0,434 + 0,015 a

G/R	NGRDI	gNDVI	SR
1,634 + 0,043 a	0,240 + 0,013 a	0,078 + 0,039 a	1,930 + 0,351 a
1,717 + 0,054 a	0,263 + 0,015 a	0,133 + 0,055 a	2,290 + 0,570 a
1,710 + 0,010 a	0,261 + 0,003 a	0,128 + 0,020 a	2,214 + 0,172 a
1,744 + 0,013 a	0,271 + 0,003 a	0,185 + 0,018 a	2,540 + 0,163 a

En el cas del 15 de maig, els valors de fIPAR (estimació de biomassa) són més elevats per dosis de 180 kg N/ha, però en canvi, els valors de CCM (clorofil·la) són més elevats per dosis de 60 kg/ha.

S'observa també que no hi ha diferències entre les mitjanes i per això només apareix la lletra a en totes les variables.

Taula 4.4: Valors de fIPAR i CCM (mitjana i error estàndard de la mitjana) per als diferents nivells d'adobat nitrogenat el 8 de juny. Els valors seguits de lletres diferents indiquen diferències significatives ($P < 0,05$) d'acord amb el test de Tuckey.

8 JUNY	fIPAR	CCM	NDVI
N0	0,542 + 0,900 a	21,154 + 0,213 a	0,167 + 0,017 a
N60	0,628 + 0,076 a	32,650 + 3,750 ab	0,254 + 0,151 b
N120	0,632 + 0,500 a	30,225 + 0,990 b	0,254 + 0,151 b
N180	0,684 + 0,036 a	34,200 + 3,030 b	0,294 + 0,006 b

G/R	NGRDI	gNDVI	SR
1,515 + 0,016 a	0,205 + 0,005 a	0,038 + 0,180 a	1,405 + 0,859 a
1,617 + 0,014 ab	0,236 + 0,004 ab	0,020 + 0,012 ab	1,684 + 0,936 ab
1,602 + 0,042 ab	0,231 + 0,012 ab	0,028 + 0,020 ab	1,700 + 0,190 ab
1,652 + 0,116 b	0,246 + 0,003 b	0,0522 + 0,003 b	1,835 + 0,419 b

Pel 8 de juny en el cas de fIPAR i CCM, els valors més alts es troben a dosi més altes.

Tant l'índex de vegetació de diferència normalitzada (NDVI), com la resta d'índexs, tenen uns valors mitjans inferiors als del 15 de maig, degut potser a que la vegetació es trobava en estat de senescència i tenia una coloració més groga.

Aquí sí que hi ha diferències entre tractaments. Per dosis de 180 kg/N ha, els valors dels índexs són els més elevats i és on existeix la màxima diferència a la dosi de 0 kg N/ha.

Taula 4.5: Valors de Rendiment i biomassa (mitjana i error estàndard de la mitjana) per als diferents nivells d'adobat nitrogenat. Els valors seguits de lletres diferents indiquen diferències significatives ($P < 0,05$) d'acord amb el test de Tuckey.

Adobat	RENDIMENT	BIOMASSA
N0	4523 + 669 a	8217 + 1443,7 a
N60	5991 + 863 a	10612 + 1287,9 a
N120	6234 + 472 a	11130 + 834,1 a
N180	6111 + 329 a	10737 + 662,4 a

En el cas del rendiment i biomassa, els valors òptims es troben en dosis de 120 kg N/ha i per dosis de 180 kg N/ha comencen a disminuir.

Efectes de l'adobat nitrogenat (aportació de N)

Finalment es va comprovar si el fet d'aplicar dosis d'adobat nitrogenat té efectes en les variables estudiades.

Taula 4.6: Valors de les variables (mitjana i error estàndard de la mitjana) amb adobat o sense adobat el 15 de maig.

Data	15 MAIG		
Índex	Adobat	Sense adobat	P
fIPAR	0,629 + 0,076	0,581 + 0,032	0,320
CCM	32,663 + 3,306	26,388 + 2,562	0,014
NDVI	0,440 + 0,061	0,357 + 0,075	0,081
G/R	1,722 + 0,051	1,634 + 0,075	0,043
NGRDI	0,265 + 0,014	0,240 + 0,022	0,042
gNDVI	0,199 + 0,059	0,129 + 0,067	0,114
SR	2,605 + 0,379	2,141 + 0,388	0,098
GLI	0,175 + 0,009	0,183 + 0,017	0,343

Taula 4.7: Valors de les variables (mitjana i error estàndard de la mitjana) amb adobat o sense adobat el 8 de juny.

Data	8 JUNY		
Índex	Adobat	Sense adobat	P
fIPAR	0,648 + 0,089	0,542 + 0,156	0,160
CCM	32,359 + 4,604	21,154 + 0,368	0,002
NDVI	0,326 + 0,034	0,228 + 0,029	0,001
G/R	1,615 + 0,045	1,506 + 0,027	0,003
NGRDI	0,235 + 0,012	0,202 + 0,008	0,003
gNDVI	0,099 + 0,024	0,028 + 0,030	0,002
SR	1,974 + 0,146	1,594 + 0,097	0,002
GLI	0,170 + 0,009	0,159 + 0,009	0,094

Taula 4.8: Valors de les variables (mitjana i error estàndard de la mitjana) amb adobat o sense adobat de Rendiment i Biomassa.

Variable	Adobat	Sense adobat	P
RENDIMENT (kg/ha)	6112 + 905	4523 + 1159	0,033
BIOMASSA (kg/ha)	10828 + 1466	8217 + 2500	0,046

Observant primerament les taules anteriors es veu com tant pel 15 de maig com pel 8 de juny, els valors de les variables són superiors quan s'aplica adobat nitrogenat que quan no s'aplica.

No hi ha diferències en el fIPAR però sí en el CCM. També hi ha diferències significatives en tots els índexs a excepció del GLI.

A continuació es mostren els gràfics de cada variable amb més detall.

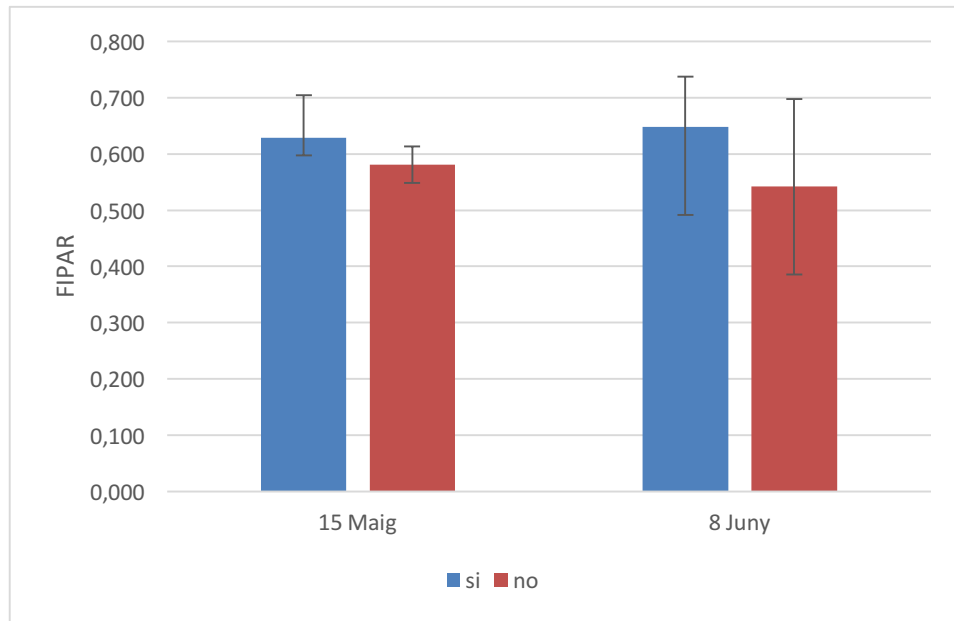


Figura 4.9: Valors de la mitjana de fIPAR amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

En la *figura 4.9* es pot observar la diferència entre els nivells de biomassa de les parcel·les amb adobat i les que no van ser tractades amb fertilitzant nitrogenat. En ambdós dies, la biomassa és superior en les parcel·les tractades, tot i que el 15 de maig, aquesta diferència és menor. Es pot remarcar que el 8 de juny, el fIPAR (biomassa) és superior a la del 15 de maig.

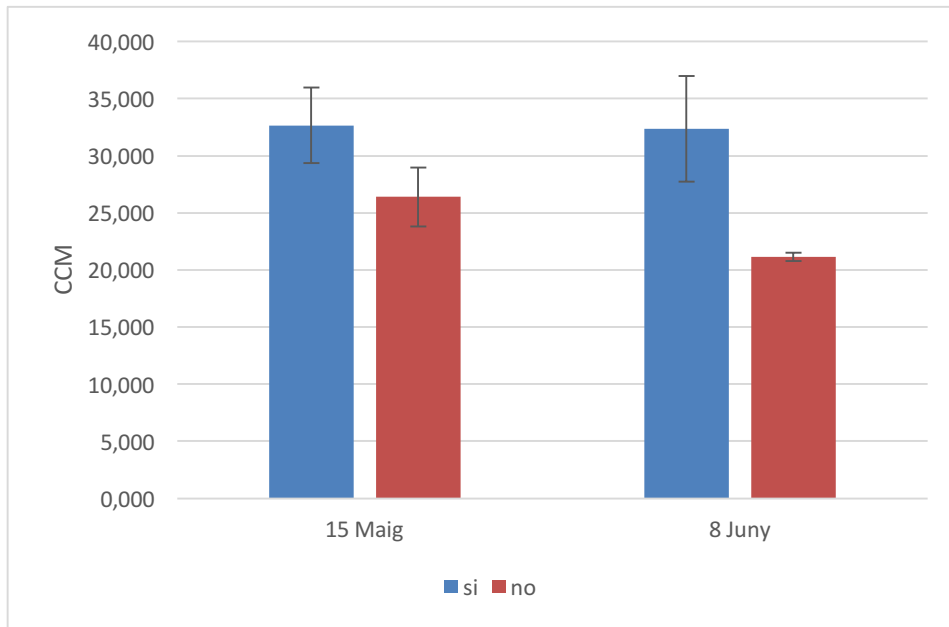


Figura 4.10: Valors de la mitjana de CCM amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

En la *figura 4.10* s'observa les diferències entre parcel·les tractades amb nitrogen i les que no ho van ser i els valors de CCM (nivells de clorofil·la). En aquest cas, la diferència també és menor el 15 de maig i els valors de CCM són superiors en parcel·les tractades amb adobat nitrogenat. Tant pel 15 de maig com pel 8 de juny, els valors de CCM en parcel·les tractades són molt similars.

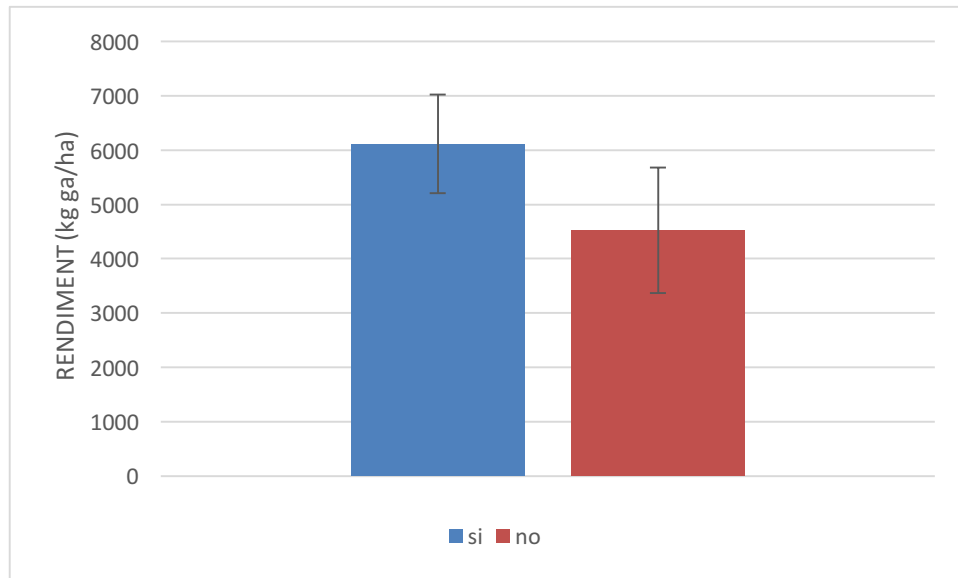


Figura 4.11: Valors de la mitjana de Rendiment amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.11*, s'observa el rendiment de les parcel·les entre les tractades amb adobat de les que no ho van ser. Com que el rendiment va ser mesurat a posteriori, a finals de juny, només tenim uns valors d'un únic dia, òbviament, tenen un rendiment més elevat les que van aplicar-hi nitrogen.

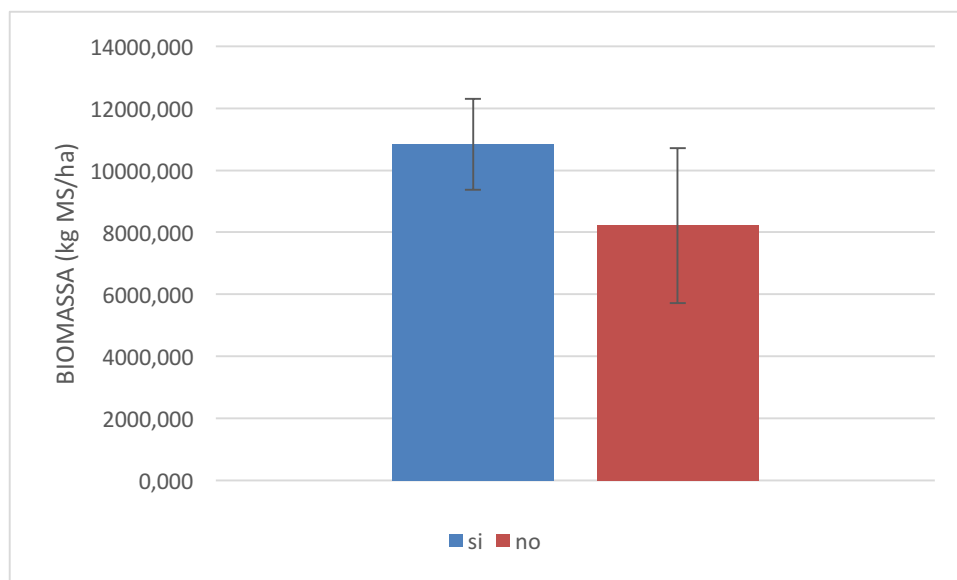


Figura 4.12: Valors de la mitjana de Biomassa amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.12*, es veu la biomassa de les parcel·les entre les tractades amb adobat i les que no ho van ser. Com que la biomassa també va ser mesurada a posteriori, a finals de juny, només tenim uns valors d'un únic dia i, òbviament, tenen més biomassa les que van aplicar-hi nitrogen.

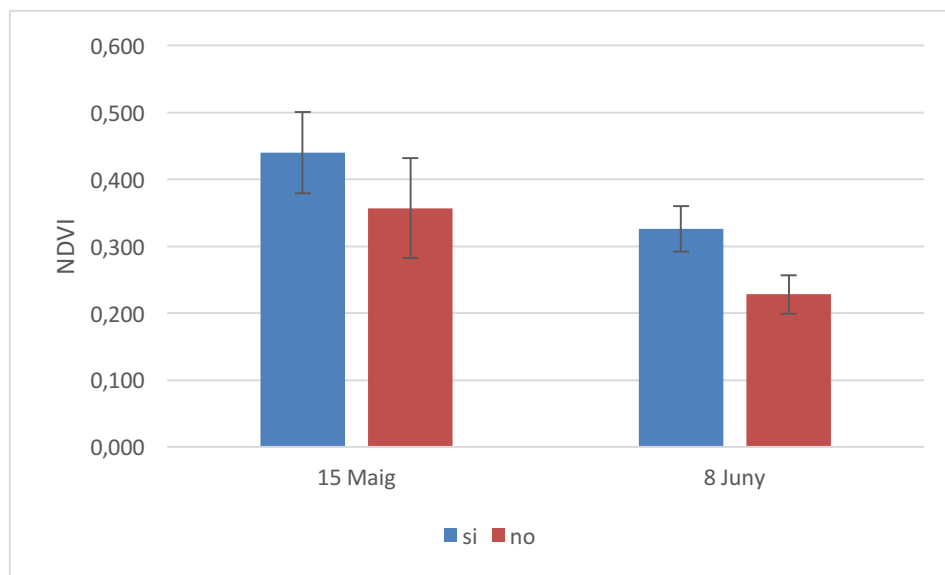


Figura 4.13: Valors de la mitjana de NDVI amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.13*, l'índex de diferència normalitzada, també és superior en les parcel·les adobades. El 8 de juny, aquest índex és lleugerament inferior al 15 de maig.

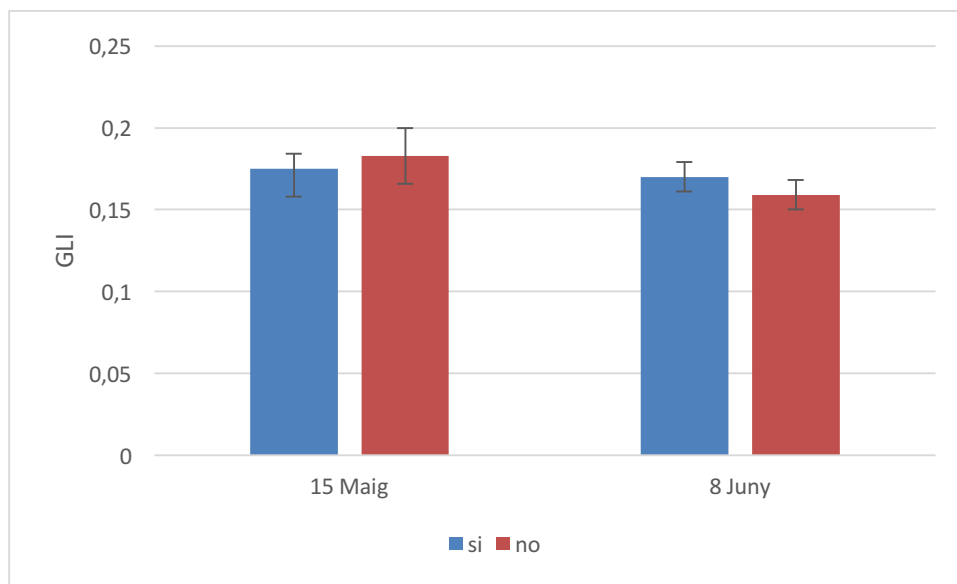


Figura 4.14: Valors de la mitjana de GLI amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

En la *figura 4.14*, s'observa que les parcel·les que tenen més àrea verda (índex GLI elevat) són les que no van ser tractades amb adobat nitrogenat el dia 15 de maig, però el 8 de juny és al revés.

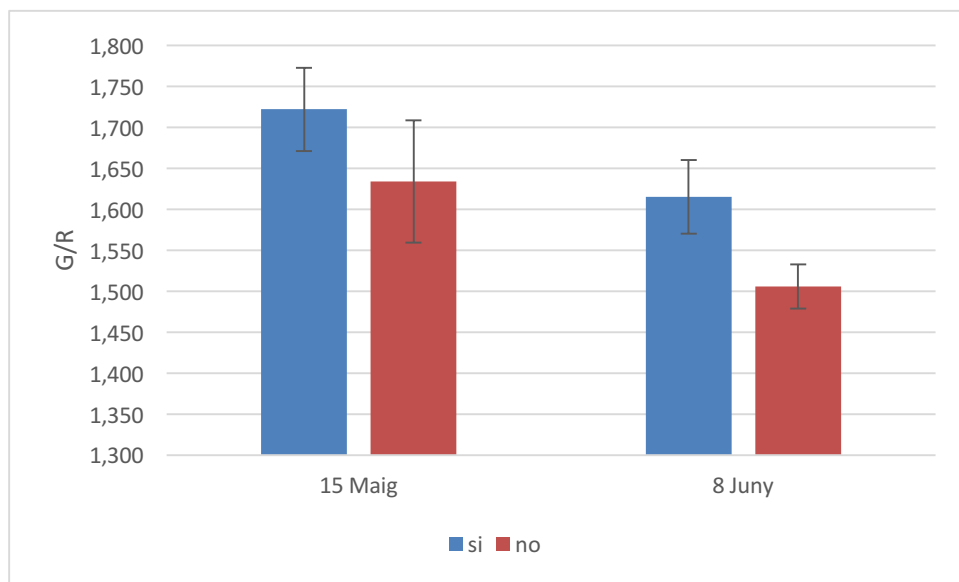


Figura 4.15: Valors de la mitjana de G/R amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.15*, també es pot observar que el fet d'aplicar adobat nitrogenat a les parcel·les de blat, incrementa els nivells de l'índex G/R.

Els valors d'aquest índex disminueixen a mesura que la vegetació entra en senescència.

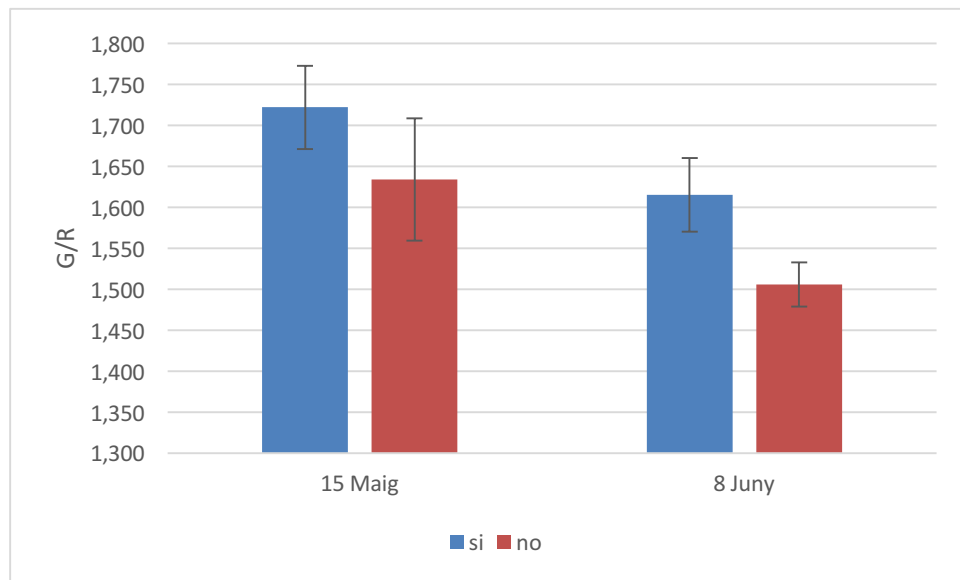


Figura 4.16: Valors de la mitjana de gNDVI amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.64*, també es pot observar que el fet d'aplicar adobat nitrogenat a les parcel·les de blat, incrementa els nivells de l'índex gNDVI.

El 8 de maig, les parcel·les no tractades amb adobat nitrogenat tenen uns valors gairebé nuls de gNDVI. La verdor de la vegetació en aquesta data, era pràcticament nul·la.

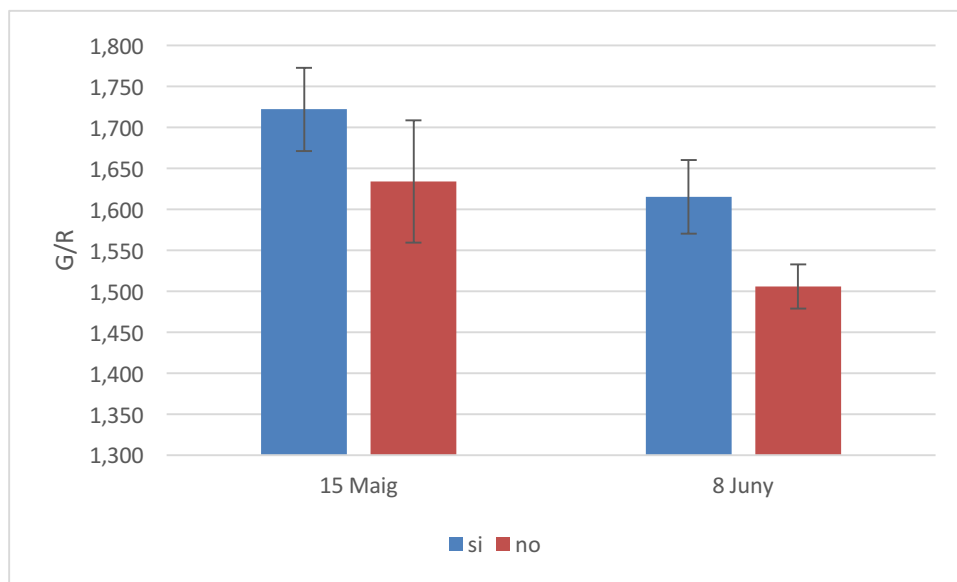


Figura 4.17: Valors de la mitjana de NGRDI amb adobat o sense adobat i error estàndard de la mitjana.

Observant la *figura 4.17*, també es pot observar que el fet d'aplicar adobat nitrogenat a les parcel·les de blat, incrementa els nivells de l'índex NGRDI, encara que la diferència es molt petita en comparació amb altres índexs calculats anteriorment.

Pel 8 de juny, els valors també són menors que en el 15 de maig.

5. DISCUSSIÓ

Relacions índexs amb fIPAR i CCM

Generalment, les relacions entre fIPAR i els valors dels índexs eren superiors el 15 de maig que no pas el 8 de juny, quan la vegetació estava ja en estat de senescència (Serrano et al, 2000).

Tal i com s'observa en la *Taula 4.1*, tots els índexs calculats en aquest treball a excepció del GLI (índex de fulla verda) es troben correlacionats amb els valors de CCM (nivells de clorofil·la), fIPAR (valors de biomassa), rendiment i biomassa amb uns valors de P inferiors al 0,05. Aquesta correlació es pot veure observant els coeficients de determinació (R^2) en els gràfics 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 i 4.8 i en els coeficients de *Pearson* (R) en la taula 4.1, propers a 1 i ens indiquen la existència d'aquesta correlació entre variables.

Idoneïtat dels índexs amb fIPAR i CCM

Els índexs espectrals SR, NDVI i gNDVI, que inclouen la banda del NIR en la seva formulació, presenten relacions amb el fIPAR similars (Serrano et al, 2000 i Asrar et al 1984). Els índexs espectrals formulats amb les bandes G i R (G/R i NGRDI) mostren relacions amb fIPAR lleugerament menors que els índexs formulats amb el NIR, però tot i així altament significatius.

En les condicions de l'assaig, tots els índexs estudiats tret del GLI presenten correlacions significatives i de similar magnitud amb els valors de CCM.

Idoneïtat dels índexs amb biomassa i rendiment

Degut a l'estreta dependència entre biomassa i fIPAR, així com entre rendiment (que representa una fracció de la biomassa) i fIPAR, els índexs SR, NDVI i gNDVI són bons

predictors del rendiment i la biomassa (Serrano et al 2000). D'altra banda, els índexs formulats amb les bandes del visible presenten correlacions lleugerament menors.

Diferències entre tractaments

Per valorar diferències entre tractaments, es van analitzar els resultats mitjançant l'anàlisi de variància (ANOVA) amb el programa spss. Pel que fa a les lectures de fIPAR, no s'han trobat diferències significatives entre tractaments ni pel 15 de maig ni pel 8 de juny on $P=0,548$ i $P=0,533$ respectivament. No hi ha diferències tampoc en rendiment i biomassa entre tractaments amb una $P=0,248$ i $P=0,302$ respectivament, degut a la gran variabilitat entre repeticions, (valors molt dispersos), tot i així, els valors de rendiment i biomassa del blat són òptims per dosis d'adobat nitrogenat de 120 kg/ha.

Pel que fa a la capacitat dels índexs espectrals per estimar les variacions en el contingut de nitrogen veiem que el CCM, presenta diferències marginalment el 15 de maig on $P=0,074$ i també el 8 de juny on $P=0,023$

Pel que fa als índexs, no s'han trobat diferències entre tractaments el 15 de maig, però sí que hi ha diferències el 8 de juny en NDVI ($P=0,008$), G/R ($P=0,02$), gNDVI ($P=0,013$) i SR ($P=0,011$).

El 15 de maig els valors de la mitjana de fIPAR i CCM són òptims per dosis de 180 kg/ha i 60 kg/ha respectivament, mentre que pel 8 de juny, els nivells òptims de CCM i fIPAR es troben en les parcel·les amb 180 kg N/ha.

Tant pel dia 15 de maig com pel 8 de juny, els valors de la mitjana dels índexs són majors per a dosis de 180 kg N/ha.

6. Conclusions

No hi ha diferències significatives en els valors de CCM, rendiment, biomassa i els índexs espectrals entre tractaments el 15 de maig tot i que la tendència és a augmentar a majors dosis d'adobat.

El 8 de juny es van trobar diferències significatives en els valors de CCM, NDVI, G/R, NGRDI, gNDVI i SR entre tractaments.

Els índexs NDVI, SR, gNDVI, presenten correlació significativa amb fIPAR, rendiment i biomassa similar a l'obtinguda amb els índexs NGRDI i G/R formulats amb les bandes del visible.

Els índexs NDVI, SR, gNDVI, NGRDI i G/R presenten correlació significativa amb CCM.

L'índex GLI no té cap relació entre fIPAR, CCM, rendiment i biomassa.

Els nivells de clorofil·la (estimada en CCM) , biomassa, rendiment, i els valors de tots els índexs són significativament majors a l'aplicar adobat nitrogenat.

Els índexs espectrals formulats amb les bandes del visible proporcionen bones estimacions de contingut de clorofil·la.

Els índexs espectrals que inclouen la banda del NIR són millors predictors de la biomassa i el rendiment.

Els resultats mostren que les càmeres convencionals de baix cost poden proporcionar informació útil per estimar el contingut de nitrogen en blat.

Bibliografia

Asrar, G. Fuchs, M. Kanemasu, E.T. Hatfield, J. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. 76:300–306.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental. 3ª ed. Barcelona, España: Editorial Ariel.

Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S., Perry, E. M. and Akhmedov, B. 2013. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21, 103–112

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J. and Merzlyak, M. N. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58, 289–298.

Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 663–666.

Louhaichi, M., Borman, M.M., Johnson, D.E., 2001. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International* 16, 65–70.

Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado- Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, 13(8), 10823-10843.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti, E.P., Becker, M. (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1: Technical Presentations*, NASA SP-351. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, 09–317.

Schirrmann, M., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., Lentschke, J. and Dammer, K. 2016. Monitoring Agronomic Parameters of Winter Wheat Crops with Low-Cost UAV Imagery. *Remote Sens* 8, 706

Serrano, L., Filella, I., & Penuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40(3), 723-731.

Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127–150.

Wiegand, C., Richardson, A., Escobar, D. and Gerbermann, A. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*. 35, 105-119.